

中国海域煤型油气成因理论

张功成^{1,2}, 陈莹¹, 李增学², 李友川¹, 兰蕾¹, 刘世翔¹, 孙瑞¹

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100029; 2. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:对中国海区及邻域14个含煤盆地组成的巨型含煤盆地带的煤型油气进行了系统分析。该巨型含煤盆地带经历了古新世、始新世、早渐新世、晚渐新世和中新世—上新世等5个成煤期,发育了三角洲、扇三角洲和潮坪—潟湖3种成煤环境。巨型含煤盆地带以煤型烃源岩为主,煤系与海相烃源岩具有“二元结构”发育模式。通过对烃源岩、凝析油、天然气样品的实验分析,发现该巨型含煤盆地带煤成烃具有“四阶段”生烃模式,并且煤型烃源岩生气极限 R_o (镜质体反射率)可达到4.38%,极大地拓展了天然气生成范围。该巨型含煤盆地带煤型烃源岩形成了凹陷边缘煤系和凹陷内部陆源海相两种油气成藏模式,在这两种成藏模式控制下,形成了多个大型煤型油气富集区。

关键词:生烃模式;二元结构;成煤环境;聚煤域;含煤盆地带;中国海区及邻域

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Theory on genesis of coaliferous petroleum in the China Sea

Zhang Gongcheng^{1,2}, Chen Ying¹, Li Zengxue², Li Youchuan¹, Lan Lei¹, Liu Shixiang¹, Sun Rui¹

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100029, China; 2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The study systematically analyzes coaliferous petroleum in a giant coal-bearing basin belt consisting of 14 coal-bearing basins in the China Sea and its surroundings. The evolution of the giant coal-bearing basin belt spanned five periods of coal formation, that is the Paleocene, the Eocene, the Early Oligocene, the Late Oligocene and the Miocene-Pliocene, in coal-forming environments of deltas, fan deltas and tidal flat-lagoons. The coaliferous source rocks dominate in the giant basin belt, featuring a “dual structure” of coaliferous and marine source rocks development. Experimental analysis of source rock, gas condensate, and natural gas samples indicates that the coal-bearing basin belt is characterized by a “four-stage” hydrocarbon generation model, and the coal-generating limit of the coaliferous source rocks (reflectance of vitrinite R_o) can reach up to 4.38%, greatly expanding the lower limit of natural gas generation. The coaliferous source rocks in the basin belt feature two modes of hydrocarbon accumulation, that is, accumulation of hydrocarbons from the coal measures on the margin of the sag and that from the terrigenous marine source rocks within the sag, under the guidance of which multiple large-scale coaliferous hydrocarbon enrichment zones are developed.

Key words: hydrocarbon generation mode, dual structure, coal forming environment, coal-accumulating domain, coal-bearing basin belt, China Sea and its surroundings

引用格式:张功成,陈莹,李增学,等. 中国海域煤型油气成因理论[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 553-565. DOI: 10.11743/ogg20220306.

Zhang Gongcheng, Chen Ying, Li Zengxue, et al. Theory on genesis of coaliferous petroleum in the China Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 553-565. DOI: 10.11743/ogg20220306.

收稿日期: 2021-05-18; 修订日期: 2022-03-21。

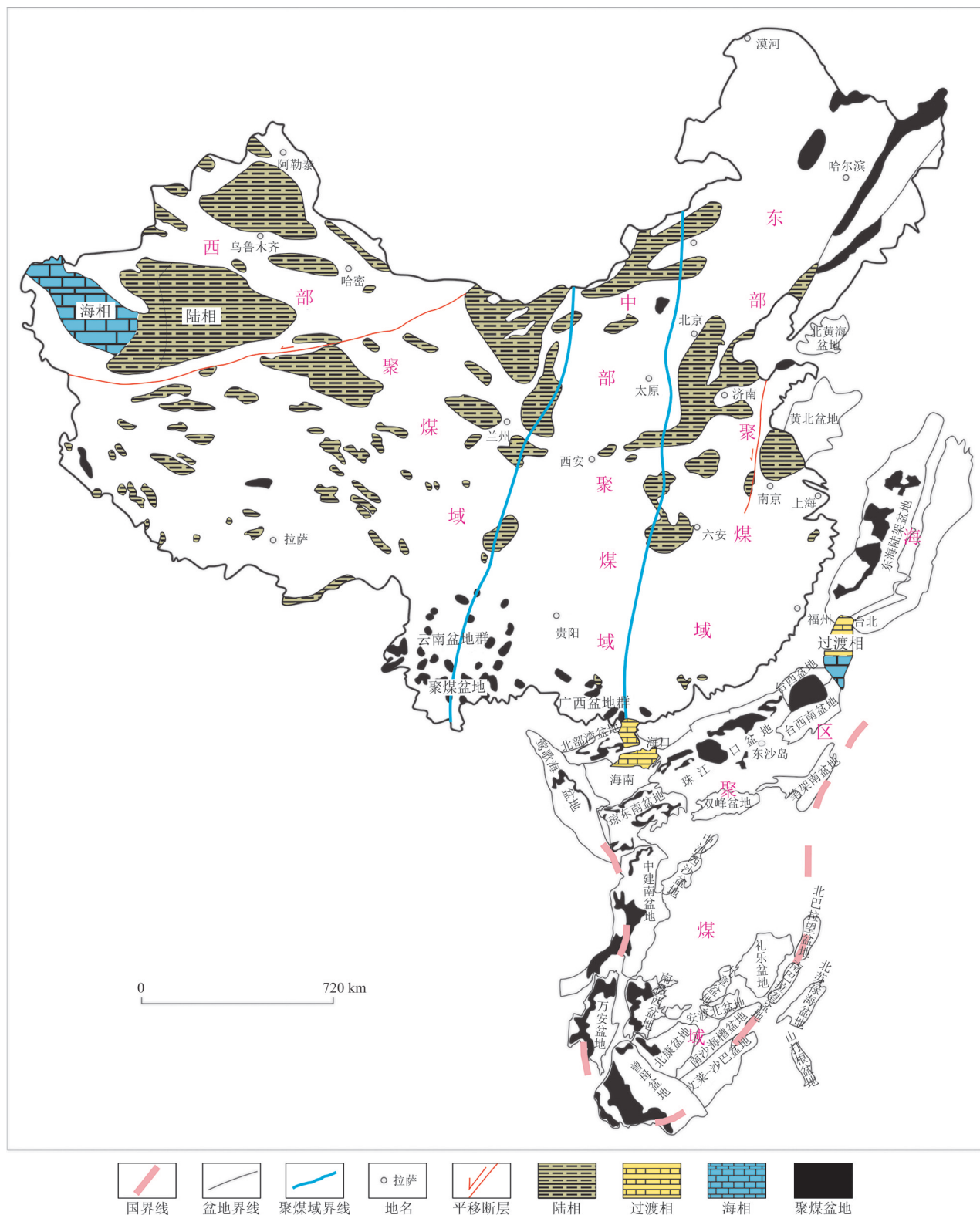
第一作者简介: 张功成, 男, (1966—), 博士、教授级高级工程师, 海洋石油天然气地质学。E-mail: zhanggch@cnooc.com.cn。

通讯作者简介: 李增学(1954—), 男, 博士、教授, 煤地质学与盆地分析。E-mail: lizengxue@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41872172, 42072188); 国家科技重大专项(2016ZX05026, 2011ZX05025, 2008ZX05025); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB219400)。

煤型烃源岩包括煤系及来自煤系的陆源分散有机质,是重要的烃源岩类型之一。澳大利亚西北大陆架、吉普斯兰盆地,俄罗斯西萨哈林盆地,印度尼西亚库太盆地,尼罗河三角洲盆地等大型-巨型油气区的烃源

岩都是煤型烃源岩^[1-2]。中国成煤时代多^[3],煤系分布广泛,以贺兰山—龙门山、大兴安岭—太行山—武夷山及东南海岸线为界,可以分成4个聚煤域(图1),分别是包括准噶尔盆地、吐哈盆地、塔里木盆地、柴达木盆



地和羌塘盆地等在内的中国西部聚煤域;包括鄂尔多斯盆地和四川盆地在内的中国中部聚煤域;包括松辽盆地在内的中国东部聚煤域^[4]及中国海区聚煤域。前3个位于陆上,后者位于海域。陆上的3个聚煤域都已发现一大批与煤系有关的天然气田和油田,其中鄂尔多斯盆地、塔里木盆地库车坳陷天然气探明储量规模均已达数万亿立方米^[5-10]。

处于欧亚大陆东南缘的中国海区及邻域发育26个新生代沉积盆地,对其中湖相烃源岩的研究程度高,但对煤型烃源岩的研究程度总体偏低,往往局限于个别凹陷、盆地或某个海域,缺乏整体性研究。

中国陆上的煤型烃源岩主要发育在板块内部、时代为古生代和中生代,而海域盆地主要分布在板块边缘、成盆时代为新生代,构造活动性强、时代新,不在有利的环境与成煤时代,没有可借鉴的成煤模式。与陆上古生代和中生代含煤岩系相比,中国海区及邻域盆地的含煤岩系时空分布不清、优势沉积相不明、油气形成机制待深入、对其形成油气的鉴定标志研究甚少^[10-14]。因此,亟需开展海上煤型烃源岩的发育与保存机理及其分布预测等研究,以指导生烃潜力的评价与勘探实践。

1 中国海区及邻域含煤盆地分布

中国海区及邻域主要发育新生代盆地(图2),位于

欧亚大陆板块内缘和外缘两种大地构造环境内^[15-26],至今已勘探60余年,钻探井上千口,发现了数百亿吨油当量油气。根据油气源与烃源岩对比、录井资料、测井资料分析,发现位于大陆板块内缘的盆地只发育半深湖、深湖相泥岩烃源岩,而位于大陆板块外缘的盆地烃源岩以煤系和陆源海相烃源岩为主。

2 陆缘含煤盆地成煤模式

2.1 盆地成煤期

煤系烃源岩形成受古纬度、古气候、古地理和古环境影响。一般来说,低纬度区气候湿热,植被茂盛,最有利于成煤。低纬度区的河流-三角洲体系,尤其是进积三角洲的三角洲平原最容易成煤。在这些控制因素的配置之下,中国海域共发育古新世一中、上新世以来的5个成煤期,分别是:①古新世成煤期,发育在东海台北坳陷的丽水凹陷,发育上古新统灵峰组、明月峰组陆源海相烃源岩,以前三角洲、滨浅湖环境中的含煤沼泽沉积为重要有机相;②始新世成煤期,发育在古南海南北两侧、南沙地块上始新世断拗和东海盆地的平湖期断陷,西湖凹陷平湖组煤型烃源岩是东海盆地主力烃源岩,煤系主要发育在海岸平原和潮坪,已发现30多个商业性气田;③早渐新世成煤期,主要发育在

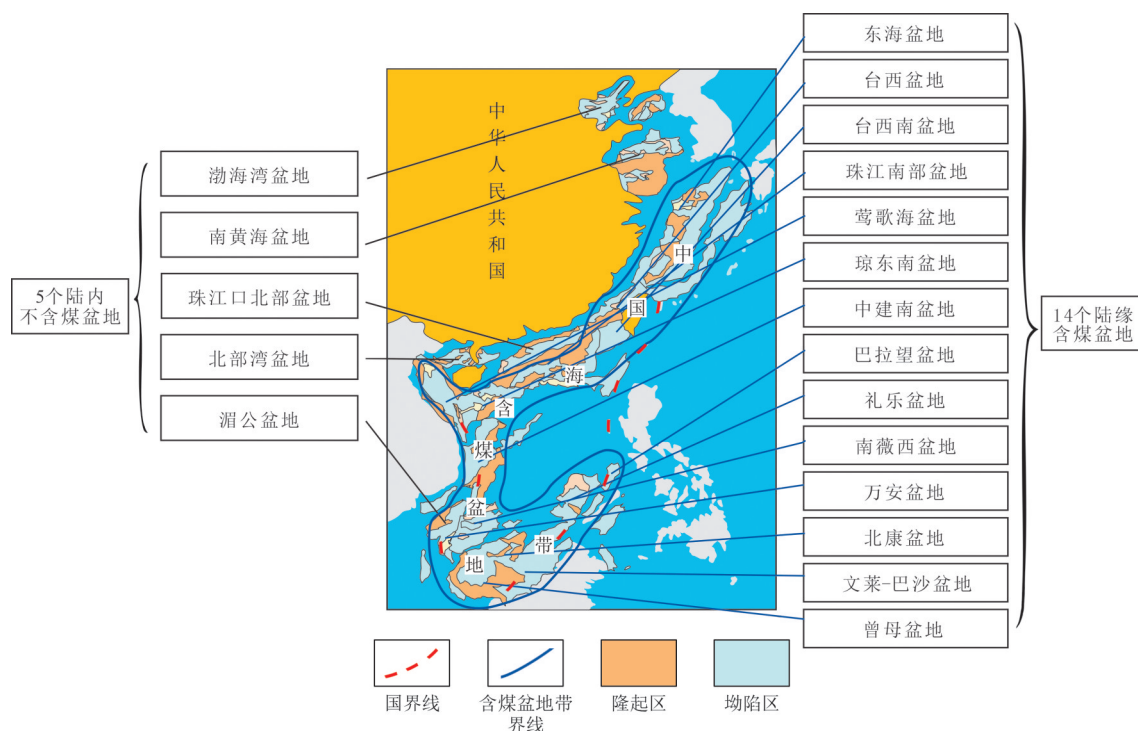


图2 中国海区及邻域含煤盆地分布

Fig. 2 Map showing the distribution of coal-bearing basin belt in the China Sea and adjacent areas

珠江口盆地北部坳陷带恩平期断陷和琼东南盆地,彼时热带低地气候高等植物和藻类繁盛,水量充沛,三角洲煤系烃源岩和浅海相泥岩烃源岩是主要烃源岩;④晚渐新世成煤期,主要发育在南海中南部的万安盆地和曾母盆地,发育多个大型煤系三角洲,提供了优质烃源岩;⑤中、上新世成煤期,主要在莺歌海、曾母和文莱-沙巴盆地发育系列大型煤系三角洲。这些盆地中形成了16个大中型煤型烃源岩发育区,聚煤区随时代变新由北向南迁移。

2.2 成煤环境

中国海区及邻域成煤环境主要有三角洲、扇三角洲和潮坪-潟湖等(图3,图4)。

2.2.1 三角洲

三角洲是中国海区及邻域盆地最重要的成煤环境。三角洲平原是成煤的最有利地带,上、下三角洲平原的过渡带部位成煤最好,煤层数多、累积厚度比较大。

如早渐新世,华南大陆山系发育,物源供给充足,而盆地地势平缓,水体较浅,导致大型三角洲持续发育,三角洲平原及河流相发育范围广泛;而珠江口盆地白云凹陷,在恩平组沉积晚期强大的物源供给使得三角洲向凹陷中心迁移,成煤环境也随着迁移,其范围扩大(图5),恩平组沉积晚期凹陷被逐渐淤积填平时期是该区成煤关键期,三角洲平原发育的分流间湾、沼泽环境是聚煤作用发生的主要场所^[27-28]。

万安盆地西斜坡渐新统三角洲^[29-30]、曾母盆地西南斜坡和东南斜坡渐新统^[31-36]、文莱-沙巴盆地中新世冠军、梅里干和沙巴三角洲^[37-40]都含煤系,发育于缓坡部位,规模大。

2.2.2 扇三角洲

扇三角洲成煤模式主要形成于琼东南盆地渐新统下部崖城组(图6),在古凸起与浅海过渡地区,如河道间和扇间洼地,以及扇前及海岸平原沼泽地区等较平坦地区植被繁盛,有利于泥炭堆积和成煤作用的发生。扇三角洲规模虽小、但成带成群出现^[41],主要发育于琼东南盆地渐新世早期断陷期。

琼东南盆地崖城组沉积时期盆地断陷结构受3大断裂带的控制,分别发育5号断裂下降盘的北部坳陷北缘含煤(扇)三角洲带、3号和2号断层下降盘的中央坳陷北缘(扇)三角洲带、南部隆起带北斜坡下的中央坳陷南缘(扇)三角洲带,发育3个中小型煤系(扇)三

角洲带(图6)。在白云凹陷渐新统恩平组沉积时期于西南断阶带下降盘也发育了煤系地层。

2.2.3 潮坪-潟湖

潮坪-潟湖成煤环境主要发育于障壁岛或古凸起到障壁作用的凹陷中(图7),潮坪的潮上带和潮间带发育的沼泽环境是发生成煤作用的主要场所。潮坪环境形成的煤层厚度较薄,煤层间距大;而在潮道不发育区,含煤层数则较少、厚度较大、层间距较小,煤层结构复杂,如果在废弃的潮道中发生成煤作用,则可形成厚煤带沿潮道分布的类型^[26]。

3 煤型烃源岩发育特征

3.1 烃源岩特征

根据天然气组成和碳同位素建立的天然气成因类型判别图版,通过对68个天然气样品的分析,中国海区及邻域含煤盆地天然气以煤型气为主^[5,42]。通过对760个烃源岩样品的有机碳和热解分析,中国海区及邻域盆地煤系烃源岩具有高的有机质丰度,煤的平均有机碳(TOC)含量大于50%,炭质泥岩的平均有机碳含量大于10%;有机质类型主要为Ⅱ₂-Ⅲ型。根据烃源岩生物标志化合物分析,其含有丰富的双杜松烷和奥利烷,指示有机质主要来源于陆生高等植物,从煤系向陆源海相烃源岩方向,双杜松烷含量降低,奥利烷含量增高。通过原油的生物标志化合物组成和碳同位素分析,中国海区及邻域含煤盆地原油中的双杜松烷和奥利烷含量丰富,普遍具有较高的姥鲛烷/植烷比值,伴生的凝析油和原油与陆生高等植物来源的有机质密切相关。基于73个烃源岩样品的全岩有机显微组分分析,中国海区及邻域古近系和新近系的煤系烃源岩富氢壳质组含量丰富,明显高于陆地区古生界和中生界煤系烃源岩,南海南部盆地壳质组含量平均高达31%,表现出很强的生油能力。

3.2 烃源岩“二元结构”发育模式

通过地震、地球化学和古生物分析,基于琼东南盆地崖城组、西湖凹陷平湖组和珠江口盆地白云凹陷恩平组沉积相及沉积环境研究,明确了以上3组地层为海-陆过渡相沉积环境。在此基础上分析了烃源岩分布特征,认为这3组烃源岩的分布呈“二元结构”型^[43](图8),即原地煤(泥炭形成及堆积与成煤同地)和异地煤(泥炭形成与堆积最终成煤不同地)煤系煤层

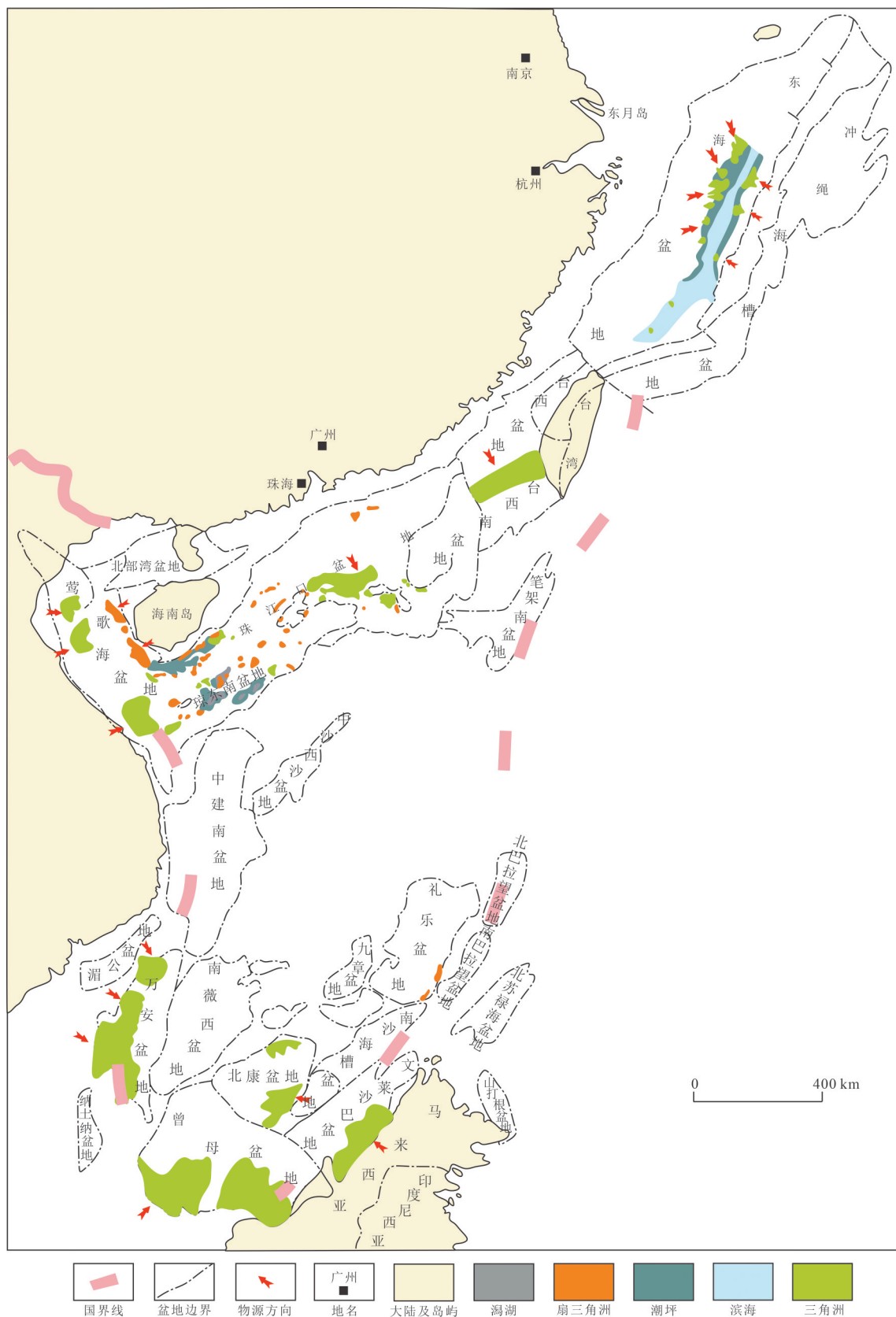


图3 中国海区及邻域盆地含煤三角洲、扇三角洲和潮坪-潟湖分布

Fig. 3 Map showing the distribution of coal-bearing deltas, fan deltas and tidal flat-lagoons in basins of the China Sea and its surroundings

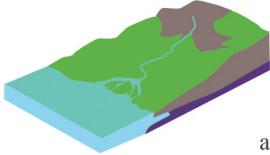
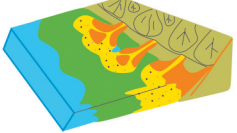
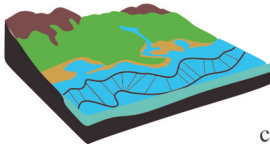
沉积相类型	模式	分布位置	代表井及层位	砂地比/%	煤地比/%	解释煤层厚度/m	煤层垂向分布	煤层平面分布	炭质/暗色泥岩	生烃潜力	气田规模
三角洲		大型河流入海处	YC 13-1-2井, 崖三段	49.0	9.15	0.40~1.16	多夹于泥岩中	受三角洲平原控制	发育	好	可形成大-中型气田
扇三角洲		主要在陡坡带	YC 8-2-1井, 崖三段	58.0	1.92	0.44~1.45	常以线形式夹于岩中	扇体间或边缘部位	很少	较好	可形成大-中型气田
潮坪-潟湖		主要在缓坡带	平湖1井, 平下段	49.5	2.32 (其他井在1.00~5.00)	0.50~1.50	两者都有	平行于岸线分布, 受地形坡度影响	较发育	较好	可形成大-中型气田

图4 中国海区及邻域新生代成煤模式及其特征

Fig. 4 The Cenozoic coal-forming patterns and their characteristics in the China Sea and its surroundings

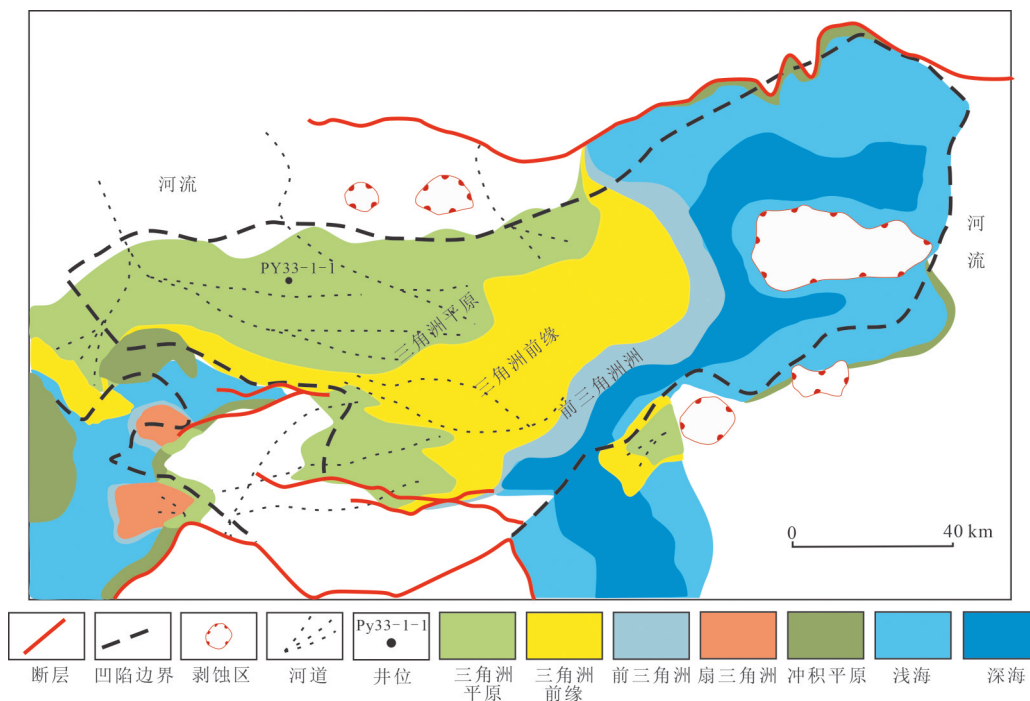


图5 珠江口盆地白云凹陷恩平组上段三角洲沉积相分布

Fig. 5 Map showing the distribution of delta facies in the upper Enping Formation in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

为一类,陆源分散有机质沉积于盆地海相沉积地层中为另一类。其中,(扇)三角洲相煤系是主力烃源岩,陆源海相烃源岩是重要烃源岩。以往陆上煤系一般只研究煤层的发育与分布;然而在海域区,除了煤层,陆源海相烃源岩也是重要的烃源岩类型。煤层往往发育在构造高部位,分布范围有限且热演化程度较低,对油气的贡献有限;而陆源海相烃源岩分布范围广,热演化程度,生烃潜力巨大,是重要的烃源岩类型。

4 煤型烃源岩生烃模式

4.1 煤型烃源岩“四阶段”生烃模式

基于西湖凹陷、珠江口盆地和琼东南盆地5个烃源岩样品的黄金管生烃动力学模拟实验,揭示中国海区及邻域煤型烃源岩具有生烃持续时间长、生烃高峰晚、多阶段生烃特征(图9)。

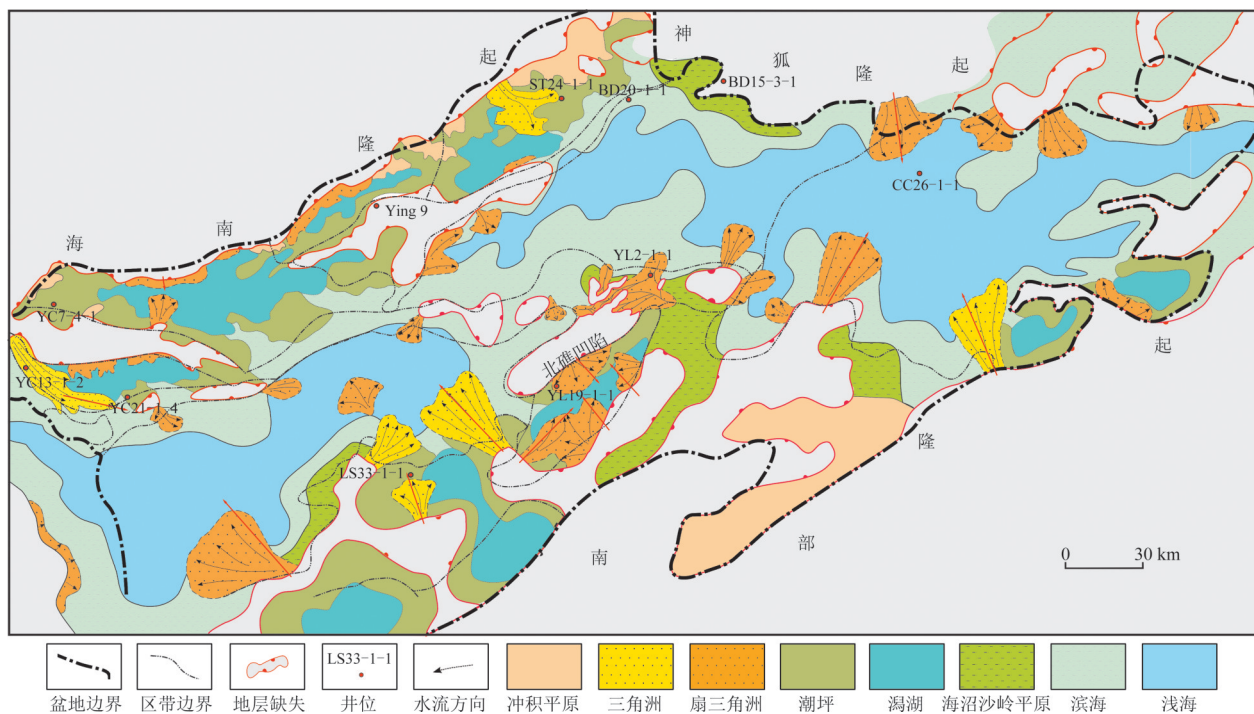


图6 琼东南盆地渐新统下部崖城组扇三角洲沉积相分布

Fig. 6 Map showing the distribution of fan delta facies of Yacheng Formation in the lower Oligocene of Qiongdongnan Basin



图7 东海盆地西湖凹陷西斜坡始新世平湖组一段-二段潮坪-潟湖沉积相分布

Fig. 7 Map showing the distribution of tidal flat-lagoon facies of the first and second members of Pinghu Formation in the slope of Xihu Sag, East China Sea Basin

的生烃高峰较晚。

4.1.4 过成熟生气阶段($R_o > 2.0\%$)

煤系烃源岩在过成熟阶段仍具有较强的生气能力。西湖凹陷平湖组煤的模拟实验结果表明,西湖凹陷平湖5井煤的总生气量为188 mg/g, R_o 大于2%阶段的生气量大约占总生气量的40%, R_o 大于3%阶段的生气量大约占总生气量的20%以上,同样说明煤的生气持续时间长,高-过成熟阶段仍有生气能力。煤系烃源岩的这种生烃特征,对于南海北部,如琼东南盆地等现今烃源岩热演化程度很高的盆地的油气勘探是非常重要的。

4.2 煤型烃源岩及其油气鉴别特征

基于典型油样碳同位素与生物标志化合物分析,建立了两项陆源海相烃源岩鉴别指标:全油碳同位素值和双杜松烷指数($T/\Sigma C_{29}ST$)(图10)。基于对崖城13-1等大气田解析发现,煤系烃源岩及其所生成油气与陆源海相烃源岩及其所生成油气的全油碳同位素值和双杜松烷指数有明显区别。

4.3 煤型烃源岩生气极限

为确定有机质生气死亡线,选取了与琼东南盆地崖城组相近的烃源岩开展了高温高压模拟实验和生烃

动力学实验。依据温度与时间互补原理及干酪根热降解生烃理论,在高压釜封闭体系与真空管式炉开放体系中,通过模拟实验产物产率的对比及生烃动力学方法,进行崖城组烃源岩生气死亡线研究,探讨中国海区及邻域含煤盆地烃源岩的生气能力。

模拟实验选择封闭体系含水延时方法和开放体系无水短时方法。封闭体系利于揭示烃源岩的累积生气过程,而开放体系利于描绘其阶段生气过程。封闭体系热模拟气体产率特征的对比分析表明,生气极限 R_o 至少在天然气阶段产率的高峰之后,其值应大于3.0% (图10)。在天然气的生成与成藏过程中,煤系烃源岩中的干酪根,以聚集和分散形式赋存的可溶有机质是主要的气源。前人研究结果表明,原油大量裂解生气明显滞后于干酪根裂解生气,导致阶段产率高峰延续到热演化的更高阶段。恒温不同时间含水实验的 R_o 和气体产率大小比较说明(图11),在500℃之前,气体产率增幅较大;在500℃,恒温80 h的 R_o 值为4.06%,气态烃产率为638.2 mL/g,与此基准对比分析,延长恒温152 h后, R_o 值为4.38%,气态烃产率为644.83 mL/g,增加幅度为1.04%;而延长恒温224 h后, R_o 值为5.05%,气态烃产率为644.88 mL/g,增加幅度接近零,变化不大,说明在延长恒温152 h后与恒温224 h的加热时间内,气体产率变化不大。通过对比分析,以延长恒温152 h的 R_o 值4.38%,确定为生气极限。

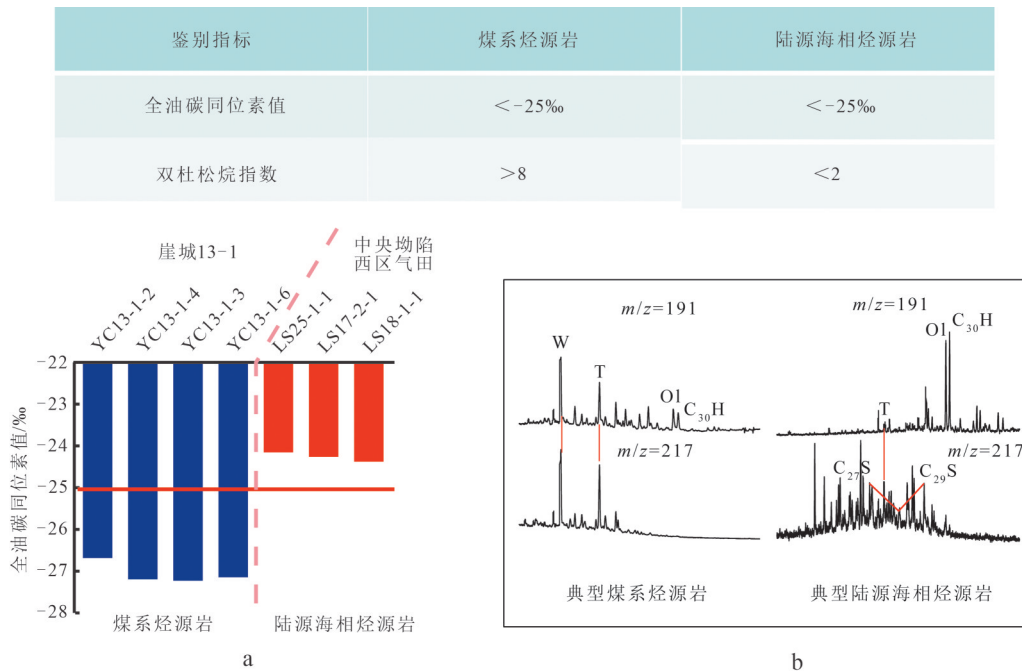


图10 煤系与陆源海相烃源岩鉴别指标

Fig. 10 Markers distinguishing coal-measure and terrigenous marine source rocks

(W为W构型双杜松烷;T为T构型双杜松烷;OI为奥利烷; $C_{30}H$ 为 C_{30} 藿烷; $C_{27}S$ 为 C_{27} $\alpha\alpha$ -20R胆甾烷; $C_{29}S$ 为 C_{29} $\alpha\alpha$ -20R胆甾烷。)

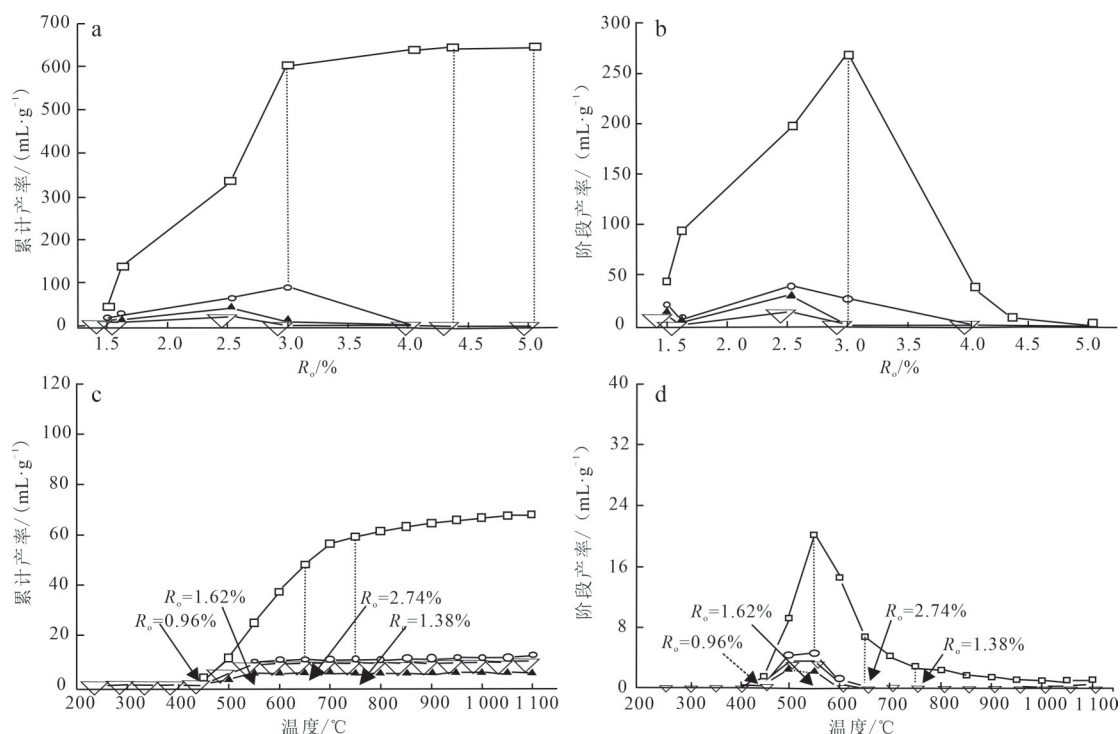


图11 高地温条件下烃源岩热解生成天然气产率曲线

Fig. 11 Yield curve of natural gas generated by source rock pyrolysis under high geothermal conditions

a, b. 封闭体系含水实验; c, d. 开放体系无水实验, 升温速率为 8 °C/min

5 煤型烃源成藏模式

受边缘海构造旋回控制, 中国海区聚煤域发育多个含煤型烃源岩深大凹陷^[43-47]。受煤型烃源岩二元结构控制, 形成了两种油气聚集模式。

5.1 凹陷边缘煤系油气成藏模式

煤系烃源岩灶分布在凹陷边缘, 油气就近或沿断裂运移成藏, 形成了多个大型煤型油气富集区^[44-47](图12)。

如白云凹陷陆架边缘三角洲大气田成藏模式, 具有“斜坡区煤系地层生烃、断层-构造脊复合输导、陆架边缘三角洲储集、晚期断裂活动驱动、油气就近高效充注”的特征(图12)。白云凹陷深水区陆架坡折带附近发育大规模的陆架边缘三角洲砂岩储集体, 断裂-构造脊组合构成的油气优势输导系统, 沟通了深部油气兼生的多套规模烃源灶, 生烃过程形成超压、晚期断裂活动造成泄压, 是主要的成藏动力, 长期发育的鼻状古隆起控制了油气富集带, 在该区已发现番禺30-1、流花20-2等陆架边缘三角洲大型商业性油气田群。

5.2 凹陷内部陆源海相油气成藏模式

中国海区及邻域盆地发育陆源海相烃源岩, 丰度

中等、规模大且资源潜力大, 油气垂向运移成藏^[44-47]。琼东南盆地深水区底辟带大气田成藏模式(图12), 具有“陆源海相烃源岩生烃、底辟垂向输导、峡谷水道砂岩储集、块体流泥岩封盖、高效充注”的特征。中新统黄流组中央峡谷水道从东向西横贯陵水凹陷, 峡谷水道内砂体与半深海-深海相泥岩形成了优质的储盖组合, 水道砂岩与深水泥岩构成的岩性圈闭被后期侵蚀充填和差异压实作用改造, 形成岩性-构造复合圈闭群, 通过热流体底辟及伴生的微断裂沟通深部渐新统煤系烃源岩, 以高压和浮力为油气运移的主要动力, 垂向运移形成天然气藏, 天然气分布横向连片、纵向多层叠置、近源垂向晚期快速高效复合成藏, 发现第一个自营深水超千亿方陵水17大气田和陵水25等一批大中型气田。

白云凹陷深水区陆坡深水扇大气田成藏模式, 具有“陆源海相烃源岩生烃、断层-底辟-砂体复合输导、陆坡深水扇砂岩储集、晚期构造活动驱动、高效充注”的特征。陆架坡折带下方的陆坡深水区发育陆坡水道、深水扇朵叶储集体, 通过断裂-底辟-砂体形成的台阶式复合输导体系与深部规模高熟烃源灶沟通, 晚期幕式断裂活动和底辟带泄压是主要的成藏动力, 长期发育的鼻状古隆起和复合输导体系控制了油气富集成藏, 以近源、晚期台阶式天然气成藏为主。该领域已发现荔湾3-1、流花28-2等多个大中型气田。

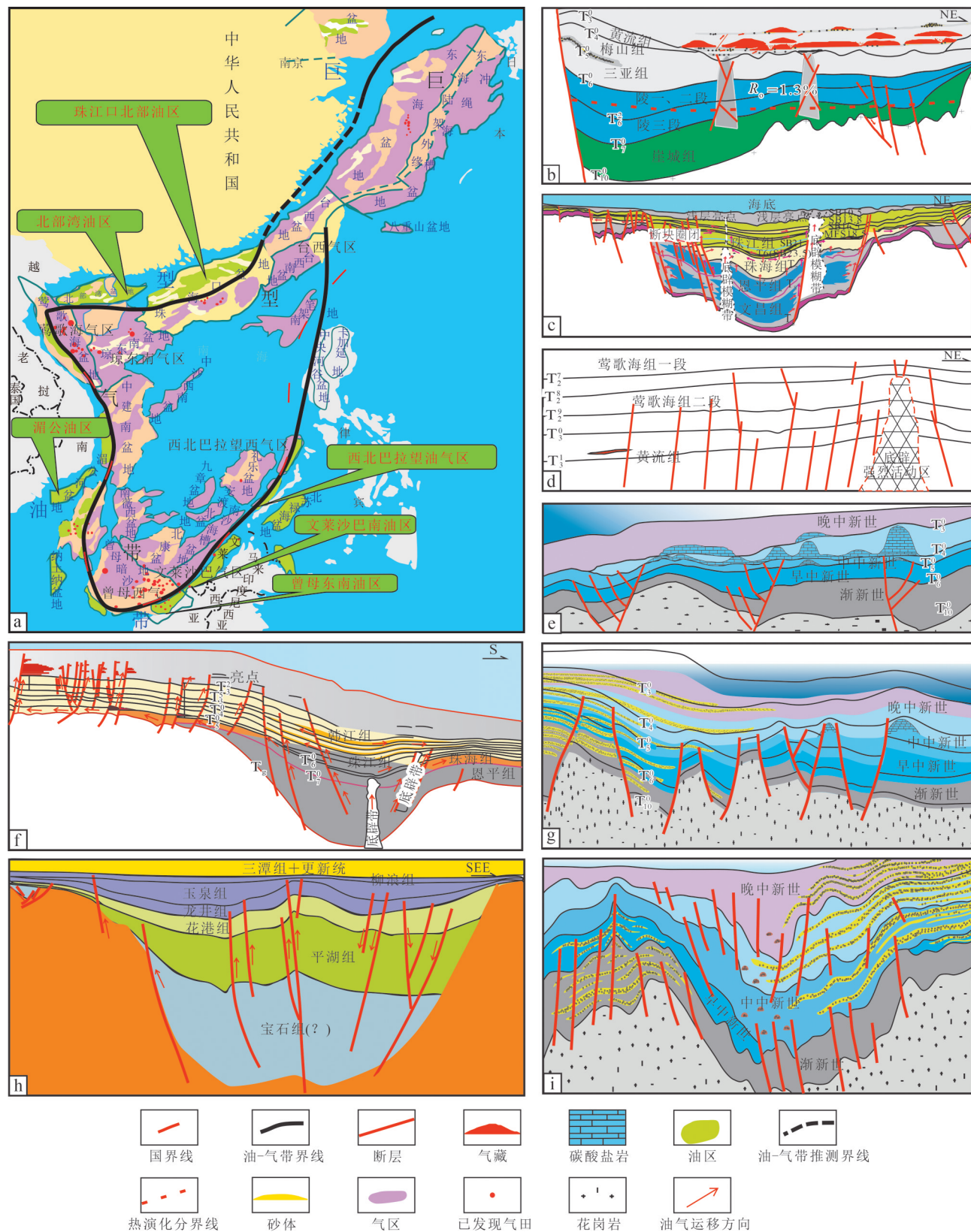


图12 中国海区及邻域盆地煤型油气成藏模式

Fig. 12 Diagrams showing accumulation modes of coaliferous hydrocarbons in basins of the China Sea and its surroundings

a. 中国海域油富集带和气富集带分布; b. 陵水17-2气田成藏模式; c. 白云深水区荔湾3-1油气成藏模式; d. 莺歌海盆地高温超压天然气成藏模式; e. 曾母盆地生物礁成藏模式; f. 番禺30-1气田成藏模式; g. 万安盆地成藏模式; h. 西湖凹陷地层格架; i. 曾母盆地和文莱-沙巴盆地沉积充填

6 结论

1) 中国海区及邻域巨型含煤盆地经历了古新世、始新世、早渐新世、晚渐新世和中新世—上新世等5个成煤演化期,其成煤模式与已有的陆上各时代成煤模式比较,是崭新的,重要价值和意义在于成煤新模式丰富了煤地质学基础理论。

2) 中国海区及邻域巨型含煤盆地煤型烃源岩由(扇)三角洲相煤系和陆源海相烃源岩组成,具有“二元结构”发育模式。这种“二元结构”煤型源岩聚集模式,成为中国海区及邻域含煤盆地煤型烃源岩形成的主要特色和机制。特别是来自陆源煤系的有机质被搬运到盆地内部,保存在海相泥岩(或砂岩)中,可以成为陆源海相泥岩。陆源海相泥岩和煤层组成了边缘海盆地煤型烃源岩的主体。

3) 中国海区及邻域巨型含煤盆地煤成油气具有“四阶段”生烃模式,并且煤型烃源岩生气极限 R_o 可达到4.38%,极大地拓展了天然气生成的上限。

4) 中国海区及邻域巨型含煤盆地煤型烃源岩形成了两种成藏模式:凹陷边缘煤系油气成藏模式和凹陷内部陆源海相油气成藏模式。

5) 中国海区聚煤域煤型油气成因理论的内涵,对指导煤型油气烃源岩的勘探和开发具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,张光亚,陶士振,等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发,2010,37(2): 129-145.
Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.
- [2] Zhang G C, Qu H J, Zhang F L, et al. Major new discoveries of oil and gas in global deep waters and enlightenment [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(1): 1-41.
- [3] Li Zengxue, Wang Dongdong, Lv Dawei, et al. The geologic settings of Chinese coal deposits[J]. International Geology Review, 2018, 60(5-6): 548-578.
- [4] Shao Longyi, Wang Xuertian, Wang Dongdong, et al. Sequence stratigraphy, paleogeography, and coal accumulation regularity of major coal-accumulating periods in China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, <http://doi.org/10.1007/s40789-020-00341-0>.
- [5] 戴金星,黄士鹏,刘岩,等. 中国天然气勘探开发60年的重大进展[J]. 石油与天然气地质,2010,31(6):689-698.
Dai Jinxing, Huang Shipeng, Liu Yan, et al. Significant advancement in natural gas exploration and development in China during the past sixty years [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 689-698.
- [6] 戴金星. 煤成气及鉴别理论研究进展[J]. 科学通报,2018,63(14):1291-1305.
Dai Jinxing. Coal-derived gas theory and its discrimination[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(14): 1291-1305.
- [7] 邹才能,赵群,陈建军,等. 中国天然气发展态势及战略预判[J]. 天然气工业,2018,38(4):1-11.
Zou Caineng, Zhao Qun, Chen Jianjun, et al. Natural gas in China: Development trend and strategic forecast [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 1-11.
- [8] 贾承造,庞雄奇,姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报,2016,1(1):2-23.
Jia Chengzao, Pang Xiongqi, Jiang Fujie. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China [J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1): 2-23.
- [9] 彭平安,邹艳荣,傅家谟. 煤成气生成动力学研究进展[J]. 石油勘探与开发,2009,36(3):297-306.
Peng Ping'an, Zou Yanrong, Fu Jiamou. Progress in generation kinetics studies of coal-derived gases [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 297-306.
- [10] 张功成,李增学,王东东,等. 中国南海海域煤地质特征[J]. 煤炭学报,2020,45(11): 3864-3878.
Zhang Gongcheng, Li Zengxue, Wang Dongdong, et al. Characteristics of coal geology in South China Sea [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3864-3878.
- [11] 李增学,吕大伟,张功成,等. 海域区古近系含煤地层及煤层识别方法[J]. 煤炭学报,2011,36(7): 586-590.
Li Zengxue, Zhang Gongcheng, Li Ying, et al. The Paleogene coal-bearing basin and coal-measures distribution of China sea area [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(4): 314-326.
- [12] 张功成,李增学,何玉平,等. 琼东南盆地煤地球化学[J]. 天然气地球科学,2010,21(5): 693-699.
Zhang Gongcheng, Li Zengxue, He Yuping, et al. Coal geochemistry of Qiongdongnan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(5): 693-699.
- [13] 李友川,米立军,张功成,等. 南海北部深水区烃源岩形成和分布研究[J]. 沉积学报,2011,29(5): 970-979.
Li Youchuan, Mi Lijun, Zhang Gongcheng, et al. The formation and distribution of source rock for deepwater area in the northern of South China Sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(5): 970-979.
- [14] 黄保家,肖贤明,董伟良. 莺歌海盆地烃源岩特征及天然气生成演化模式[J]. 天然气工业,2002,22(1): 26-30.
Huang Baojia, Xiao Xianming, Dong Weiliang. Characteristics of hydrocarbon source rocks and generation & evolution model of natural gas in Yinggehai Basin [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(1): 26-30.
- [15] 李友川,傅宁,张枝焕. 南海北部深水盆地烃源岩条件和油气源[J]. 石油学报,2013,34(2): 247-254.
Li Youchuan, Fu Ning, Zhang Zhihuan. Hydrocarbon source conditions and origins in the deepwater area in the northern South China Sea. [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 247-254.
- [16] 李家彪. 中国边缘海形成演化与资源效应[M]. 北京:海洋出版社,2008:52-62.
Li Jiabiao. Evolution of china's marginal seas and its effect of natural resources [M]. Beijing: Ocean Press, 2008: 52-62.
- [17] Zhang G C, Jia Q J, Wang W Y, et al. On tectonic framework and evolution of the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 4194-4215.
- [18] Zhang G C, Shao L, Qiao P J, et al. Cretaceous-Palaeogene sedimentary evolution of the South China Sea region: A preliminary synthesis [J]. Geological Journal, 2019, 55, 2662-2683.
- [19] Zhang H, Shao L, Zhang G, et al. The response of Cenozoic sedimentary evolution coupled with the formation of the South China Sea [J]. Geological Journal, 2020, 56: 1-22.
- [20] 张功成,谢晓军,王万银,等. 中国南海含油气盆地构造类型及勘探潜力[J]. 石油学报,2013,34(4): 611-627.
Zhang Gongcheng, Xie Xiaojun, Wang Wanyin, et al. Tectonic types of petroliferous basins and its exploration potential in the South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 611-627.
- [21] Zhang G C, Feng C J, Yao X Z, et al. Petroleum geology in deepwater settings in a passive continental margin of a marginal sea: A case study from the south China Sea [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2021, 95(1): 1-20.
- [22] 张功成,唐武,谢晓军,等. 南海南部大陆边缘两个盆地带油气地质特征[J]. 石油勘探与开发,2017,44(6): 849-859.

- Zhang Gongcheng, Tang Wu, Xie Xiaojun, et al. Petroleum geological characteristics of two basin belts in southern continental margin in South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(6): 849-859.
- [23] Wolfart R, Cepek P, Gramann F, et al. Stratigraphy of Palawan Island, Philippines [J]. *Newsletters on Stratigraphy*, 1986, 16: 19-48.
- [24] Lambiasi J J, Crevello P D, Morley C K, et al. Sedimentology, structure and petroleum systems of the Baram Delta Province, Brunei Darussalam and Sarawak Field trip summary[J]. *Indonesian Petroleum Association*, 1997, 3:1019-1020.
- [25] 张功成,李友川,刘世翔,等. “源热共控”中国海油气田“近岸油、远岸气”有序分布[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(5): 1-22.
- Zhang Gongcheng, Li Youchuan, Liu Shixiang, et al. “Co-control of source rock and heat” in orderly distribution of “near-shore oil and far-shore gas” in China’s offshore and adjacent area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(5): 1-22.
- [26] Zhao Zhigang, Liu Shixiang, Xie Xiaojun, et al. Hydrocarbon geological characteristics and reservoir forming conditions in Wan’an Basin, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(4): 9-15.
- [27] 陈莹,韩银学,边立曾,等. 南海北部深水区古近系沉积体系的东西差异及对烃源岩分布的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 1028-1037.
- Chen Ying, Han Yinxue, Bian Lizeng, et al. Difference between eastern and western Paleogene sedimentary systems in deep waters off the northern South China Sea continental margin and its effect on source rock distribution[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 1028-1037.
- [28] 李增学,何玉平,刘海燕,等. 琼东南盆地崖城组煤的沉积学特征与聚煤模式[J]. *石油学报*, 2010, 31(4): 542-547.
- Li Zengxue, He Yuping, Liu Haiyan, et al. Sedimentology characteristics and coal-forming models in Yacheng Formation of Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 542-547.
- [29] 赵志刚,刘世翔,谢晓军,等. 万安盆地油气地质特征及成藏条件[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(4): 9-15.
- Zhao Zhigang, Liu Shixiang, Xie Xiaojun, et al. Hydrocarbon geological characteristics and reservoir forming conditions in Wan’an Basin, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(4): 9-15.
- [30] 贺清,全志刚,胡根成. 万安盆地沉积物充填演化及其对油气藏形成的作用[J]. *中国海上油气*, 2005, 17(2): 80-83, 88.
- He Qing, Tong Zhigang, Hu Gencheng. Sediment filling and its effect on hydrocarbon accumulation in Wan’an Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2005, 17(2): 80-83.
- [31] 谢晓军,张功成,赵志刚,等. 曾母盆地油气地质条件、分布特征及有利勘探方向[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(1): 19-26.
- Xie Xiaojun, Zhang Gongcheng, Zhao Zhigang, et al. Hydrocarbon geology, distribution and favorable exploration direction in Zengmu Basin, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(1): 19-26.
- [32] 杨楚鹏,姚永坚,李学杰,等. 南海南部曾母盆地新生界煤系烃源岩生油条件[J]. *石油学报*, 2010, 31(6): 920-926.
- Yang Chupeng, Yao Yongjian, Li Xuejie, et al. Oil-generating potential of Cenozoic coal-measure source rocks in Zengmu Basin, the southern South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(6): 920-926.
- [33] 郭佳,谢晓军,刘世翔,等. 南海曾母盆地新生代沉积体系特征[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(4): 99-107.
- Guo Jia, Xie Xiaojun, Liu Shixiang, et al. Cenozoic sedimentary systems in Zengmu Basin, South China Sea[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(4): 99-107.
- [34] 王登,徐耀辉,文志刚,等. 曾母盆地东巴林坳陷烃源岩评价及油源探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(5): 583-590.
- Wang Deng, Xu Yaohui, Wen Zhigang, et al. Evaluation of source rocks and oil-source correlation in east Balingjian depression of Zengmu Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(5): 583-590.
- [35] 杨楚鹏,姚永坚,李学杰,等. 南海南部曾母盆地新生界煤系烃源岩生油条件[J]. *石油学报*, 2010, 31(6): 920-926.
- Yang Chupeng, Yao Yongjian, Li Xuejie, et al. Oil-generating potential of Cenozoic coal-measure source rocks in Zengmu Basin, the southern South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(6): 920-926.
- [36] 王登,徐耀辉,文志刚,等. 曾母盆地中部地区天然气与凝析油地球化学特征及成因[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(6): 1205-1213.
- Wang Deng, Xu Yaohui, Wen Zhigang, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas and condensate in the central zone of Zengmu Basin[J]. *Natural Gas Geosciences*, 2013, 24(6): 1205-1213.
- [37] 刘世翔,张功成,赵志刚,等. 南海构造旋回对曾母盆地油气成藏的控制作用[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(2): 37-44.
- Liu Shixiang, Zhang Gongcheng, Zhao Zhigang, et al. Control of tectonic cycle in South China Sea over hydrocarbon accumulation in the Zengmu Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(2): 37-44.
- [38] 刘世翔,赵志刚,谢晓军,等. 文莱-沙巴盆地油气地质特征及勘探前景[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(4): 29-34.
- Liu Shixiang, Zhao Zhigang, Xie Xiaojun, et al. Petroleum geology and exploration prospects of Wenlai-Shaba Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(4): 29-34.
- [39] 马良涛,李世熊. 西北沙巴盆地油气成藏模式及勘探方向[J]. *地质力学学报*, 2014, 20(4): 404-412.
- Ma Liangtao, Li Shixiong. Hydrocarbon accumulation model and future exploration in Northwest Sabah Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 2014, 20(4): 404-412.
- [40] 马良涛,王春修,牛嘉玉,等. 西北沙巴盆地油气地质特征及油气成藏主控因素[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(7): 36-43.
- Ma Liangtao, Wang Chunxiu, Niu Jiayu, et al. Hydrocarbon geology in NW Sabah Basin and controlling factors on hydrocarbon accumulation[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(7): 36-43.
- [41] Zhang Gongcheng, Wang Dongdong, Zeng Qingbo, et al. The characteristics of coal-measure source rock and gas accumulation belts in marine-continental transitional facies fault basins: A case study of the oligocene deposits in the Qiongdongnan Basin located in the northern region of the south China Sea[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2019, 37(6): 1752-1778.
- [42] Zhang Gongcheng, Wang Dongdong, Lan Lei, et al. The geological characteristics of the large- and medium-sized gas fields in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 2(2): 1-12.
- [43] 张功成,王琪,苗顺德,等. 中国近海海陆过渡相烃源岩二元分布模式——以珠江口盆地白云凹陷为例[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(9): 1299-1308.
- Zhang Gongcheng, Wang Qi, Miao Shunde, et al. The duality distribution pattern of marine-continental transitional hydrocarbon source rocks: A case study from Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin, China offshore[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(9): 1299-1308.
- [44] 张功成,屈红军,刘世翔,等. 边缘海构造旋回控制南海深水油气成藏[J]. *石油学报*, 2015, 36(5): 533-545.
- Zhang Gongcheng, Qu Hongjun, Liu Shixiang, et al. Tectonic cycle of marginal sea controlled the hydrocarbon accumulation in deep-water areas of South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(5): 533-545.
- [45] 张功成,米立军,吴时国,等. 深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 15-21.
- Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Wu Shiguo, et al. Deepwater area: The new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 15-21.
- [46] 张功成,杨海长,陈莹,等. 白云凹陷——珠江口盆地深水一个巨大的富生气凹陷[J]. *天然气工业*, 2014, 34(11): 11-25.
- Zhang Gongcheng, Yang Haizhang, Chen Ying, et al. The Baiyun Sag: A giant rich gas-generation sag in the deepwater area of the Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(11): 11-25.
- [47] 张功成. 南海北部陆坡深水构造演化及其特征[J]. *石油学报*, 2010, 31(4): 528-533.
- Zhang Gongcheng. Tectonic evolution of deepwater area of northern continental margin in South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 528-533.